Über den Erscheinungsbereich und den Ursprung des Effekts der Sekundärelektronenstrahlung von Isolatoren

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Berlin

von

GERHARD KATZ

aus Berlin

Tag der Promotion: 10. 9. 1937

Tag der mündlichen Prüfung: 30. 6. 1937

N 48

Referenten: Professor Dr. A. W e h n e l t

Professor Dr. M. v. L a u e

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

M E I N E N E L T E R N

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535726_0091

Einleitung

Materie, die von Kathodenstrahlen getroffen wird, sendet eine sekundäre Elektronenstrahlung meist geringer Geschwindigkeit aus, wie unter anderen Lenard und seine Schüler gezeigt haben. Gasförmige, flüssige und feste Stoffe unterscheiden sich naturgemäß in der Art, wie sie Kathodenstrahlen "reflektieren", ablenken oder absorbieren. Auch unter den festen Stoffen sind in dieser Hinsicht merkliche Unterschiede vorhanden. Dichte, chemische Zusammensetzung, namentlich aber das elektrische Leitvermögen bedingen das Verhalten fester Substanzen unter der Einwirkung von Kathodenstrahlen. So besitzen die Metalle eine wesentlich geringere Fähigkeit sekundäre Kathodenstrahlung zu emittieren als die Isolatoren, d.h. die nichtleitenden festen Substanzen. Dies zeigt sich darin, daß Metalle erst unter einem bestimmten, von der Art des Metalls und der Geschwindigkeit der Primärstrahlen abhängigen Einfallswinkel anfangen, eine Sekundärstrahlung auszusenden, die mengenmäßig die auftreffende Kathodenstrahlung überwiegt, während Isolatoren schon bei senkrechtem Strahleneinfall mehr Elektronen aussenden, als von außen auf ihre Oberfläche gelangen (1 - 6).

Noch auffallender wird der Unterschied zwischen dem Verhalten der Metalle und dem der Nichtmetalle, wenn man die Stärke der Sekundärstrahlung bei beiden mit wachsendem Einfallswinkel verfolgt. Es zeigt dann das Metall eine stetige Zunahme derselben, während beim Isolator unter einem gewissen Einfallswinkel eine plötzliche starke Abnahme des Sekundärelektronenstroms stattfindet, auf die bei noch schräger werdendem Einfall erneuter Anstieg erfolgt. Diese Eigenschaft der nichtleitenden festen Stoffe wurde 1923 von Prof. W e h n e l t am Glas entdeckt (7,8), und darauf in einer Reihe von Arbeiten seiner Schüler unter verschiedenen Gesichtspunkten näher untersucht (10-15). Die Auffindung dieser

---

(1) P.Lenard, Quantitatives über Kathodenstrahlen, Heidelberg 1918 und 1925.
(2) L.Austin u.H.Starke, Verh.d.Dtsch.Phys.Ges.4(1902),106.
(3) M.Baltruschat u. H.Starke, Phys.Zs.23(1922),403.
(4) Chr.Füchtbauer, Phys.Zs.7(1906),748.
(5) " " , Ann.d.Phys.23(1907),301.
(6) J.Laub, Ann.d.Phys.23(1907),285.
(7) A.Wehnelt, Erg.d.exakt.Naturw.4(1925),92.
(8) " " , Zs.f.Phys.48(1928),165.
(9) G.Nickel, Diss.Berlin (1923).
(10) W.Schmidt, Diss.Berlin (1924).
(11) B.Beyschlag, Diss.Berlin (1927).
(12) H.Daene, Diss.Berlin (1929).

Erscheinung war das Ergebnis von Untersuchungen, die über die Häufigkeit positiver elektrischer Ladungen an den Glaswänden von Entladungsrohren angestellt wurden und die Abhängigkeit derselben vom Auftreffwinkel der Kathodenstrahlen aufzeigen sollten. Zuvor hatte G.Nickel den Einfluß der Wandladungen auf die Gesetze der Raumladung und somit auf den allgemeinen Mechanismus von Gasentladungen nachgewiesen (9).

Die Versuche von W.Schmidt (10) über die Sekundärstrahlung der Isolatoren zeigten, daß der Einfallswinkel, bei dem die charakteristische starke Abnahme der Sekundäremission erfolgt, von der Geschwindigkeit der primären Elektronen abhängt; und zwar tritt diese Erscheinung bei umso größerem Einfallswinkel auf, je höher die Bewegungsenergie der Primärstrahlen ist. Auf Grund der Meßergebnisse glaubte man, daß der erwähnte Effekt nur bei solchen Sekundärelektronen vorhanden sei, die von primärer Kathodenstrahlung von mehr als 1300 V und weniger als 3000 V Erregungsspannung erzeugt werden.

Beyschlag (11) wies nach, daß bei Anstieg der Temperatur des reflektierenden Materials, wie er unter Umständen von schnellen Kathodenstrahlen relativ großer Stromdichte verursacht werden kann, die eigentümliche Abnahme des Sekundärstroms weniger scharf hervortritt und bereits bei 135° C völlig verschwindet. Ferner zeigte er, daß auch die Größe des kritischen Einfallswinkels temperaturabhängig ist, indem sie mit der Erwärmung des Reflektors zunimmt. Allgemein setzt eine derartige Temperaturerhöhung, besonders, wenn die Elektronen schräger als unter 60° einfallen, die Sekundärstrahlung bedeutend herab, wie I.G.Barber an Metallen feststellte (16).

Daene und Schmerwitz maßen Geschwindigkeit und Richtungsverteilung (12,13), Uredat die integrale (14) und Kalckhoff die differentiale Geschwindigkeitsverteilung (15) der von Isolatoren emittierten Elektronen. Außerdem untersuchte Uredat den Einfluß einer Gasbeladung des Reflektors auf die Sekundärstrahlung mit dem Ergebnis, daß eine Einwirkung dieser Art nicht wahrscheinlich ist.

---

(13) H.Daene u.G.Schmerwitz, Zs.f.Phys.53(1929),404.
(14) E.Uredat, Diss.Berlin (1930).
(15) G.Kalckhoff, Diss.Berlin (1933).
(16) I.G.Barber, Phys.Rev.17(1921),322.

Als Reflektormaterial wurde meist Glas, gelegentlich auch Glimmer benutzt. Ferner wurden Versuche an den Mineralien Quarz, Zinkspat ($ZnCO_3$) und Spodumen ($Li_2SiO_3.Al(SiO_3)_3$), sowie an Cellon unternommen. Doch zeigten alle diese Stoffe grundsätzlich gleiches Verhalten wie Glas, wenn auch quantitative Unterschiede in Bezug auf die Lage des kritischen Winkels und die Stärke der Sekundärstrahlung bemerkbar waren.

Während die Mehrzahl der oben erwähnten, von Schülern Prof. Wehnelts ausgeführten Arbeiten zum Ziel hatten, die meisten übrigen Eigenschaften der sekundären Kathodenstrahlung fester Nichtmetalle zu ergründen und auch quantitativ befriedigend zu erfassen, wurden hingegen seit den Versuchen von Prof. Wehnelt und Schmidt keine genaueren Messungen zwecks Bestimmung der Abhängigkeit des kritischen Winkels von der Beschleunigungsspannung der primären Kathodenstrahlen unternommen. Es blieb zudem die Frage offen, ob der untersuchte Effekt bei Primärstrahlgeschwindigkeiten unterhalb 1300 V und oberhalb 3000 V vorhanden sei, und auch in theoretischer Hinsicht war die Erscheinung bisher nicht eindeutig geklärt, was namentlich darauf zurückzuführen ist, daß der Ursprung der Elektronen, die vom Isolator kommen, umstritten blieb.

Auf Veranlassung von Herrn Professor Wehnelt unternahm ich daher den Versuch, zur experimentellen Erforschung und theoretischen Deutung noch unzureichend bekannter Eigenschaften der sekundären Kathodenstrahlung von Isolatoren einiges beizutragen.

Versuchsanordnung und Meßmethode.

Der Hauptteil der verwendeten Apparatur ist in Abbildung 1 durch einen Schnitt schematisch dargestellt.

Das vertikale Beobachtungsrohr von 4 cm innerem Durchmesser und das seitlich angesetzte Entladungsrohr von 3 cm Stärke waren aus Glas, während die in ihnen befindlichen Apparaturteile größtenteils aus Messing hergestellt wurden. Mit K ist in der Zeichnung die Glühkathode kenntlich gemacht, die aus einem 0,15 mm starken und etwa 2 cm langen Draht bestand, der vorn schleifenförmig gewunden war, um möglichst hohe Ausnutzung der Emission zu erzielen. Der Draht war auf die 1 mm starken Chromnickeleisendrähte, die der Kathode Heizstrom und negative Hochspannung zuführten, aufgeschweißt und außerdem mit dünnem Kupferdraht mit diesen Zuleitungen verbunden, um einwandfreien Kontakt zu gewähr-

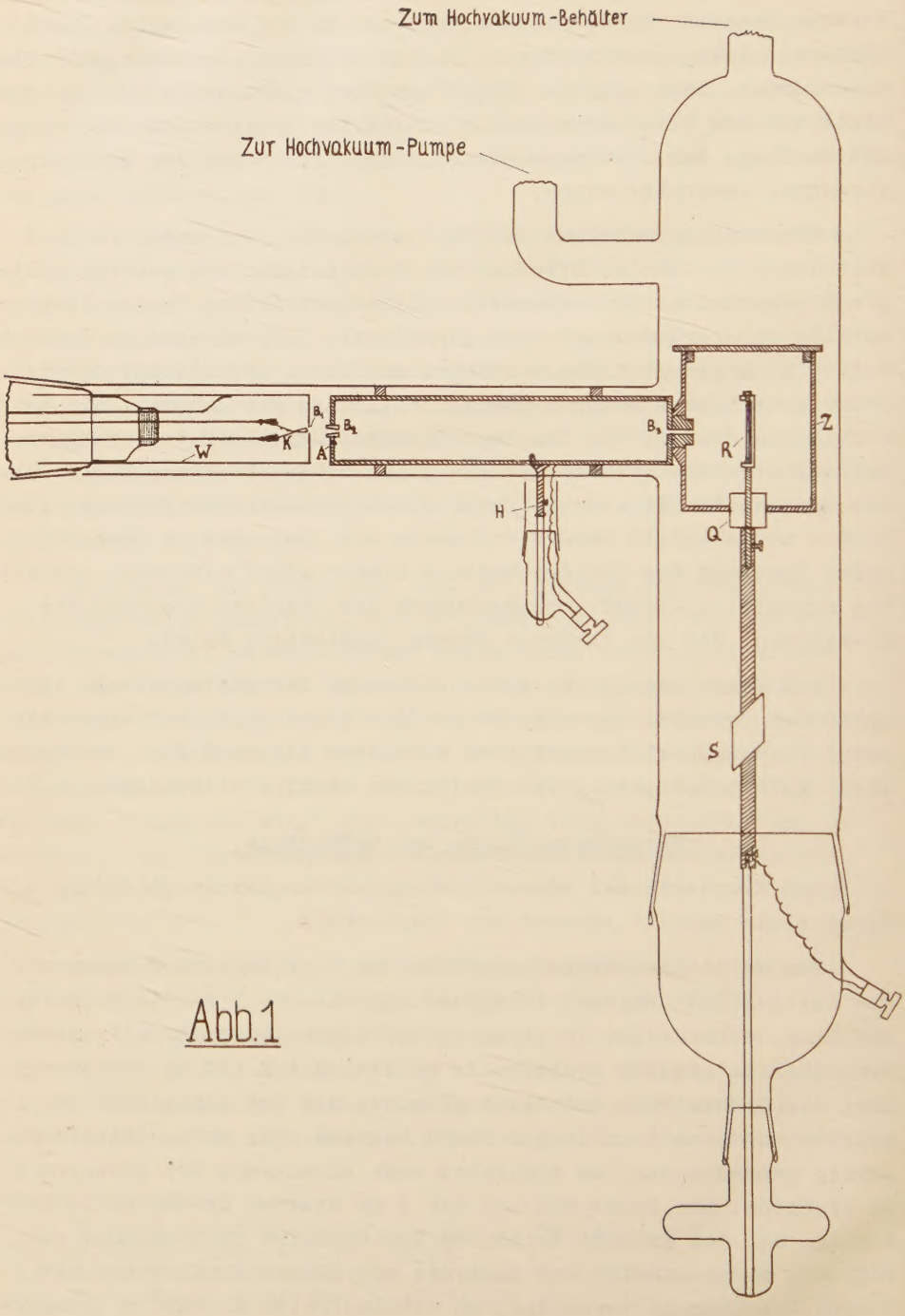

Zum Hochvakuum-Behälter
Zur Hochvakuum-Pumpe
W
K
A
B1
B2
B3
H
R
Z
Q
S

Abb.1

leisten. Als Kathodenmaterial wurde anfänglich thoriertes Wolfram benutzt, was bei einer Heizstromstärke von 2,2 - 2,6 A einen Emissionsstrom von 0,2 - 0,8 mA lieferte. Später wurde reines Wolfram verwendet, um die Emission besser konstant halten zu können. Dieselbe betrug dann bei einem Heizstrom von 2,5 - 2,7 A nur noch 1 - 4 Mikroampère, reichte aber unter Benutzung empfindlicherer Instrumente völlig aus. Hinter der Kathode gelangen die Elektronen in die erste der drei kreisförmigen Blenden, B_1, mit einem Durchmesser von 3 mm, die sich, 1,5 - 2,5 mm von der Kathode entfernt, in der Vorderwand des aus 0,1 mm starkem Vakuum-Nickelblech gearbeiteten Wehnelt-Zylinders befand, der einen Durchmesser von 20 mm erhielt. Diese viel verwendete "elektrostatische Linse" hat die Aufgabe, die Streuung des Elektronenstrahlbündels zu verhindern und dasselbe auf die nächste Blende zu konzentrieren, damit ein möglichst hoher Anteil der Gesamtemission den Reflektor R erreicht. Die Anode A besteht aus einem beiderseits geschlossenen, starkwandigen Messingrohr von 17 mm innerem Durchmesser, das in den ebenfalls aus Messing gefertigten Zylinder Z verschraubt ist. Um das Anodenrohr sind zwei verschiebbare, aber dicht aufliegende Metallringe gelegt, die ihm eine ausreichend gute Mittellage im Entladungsrohr geben. In die der Kathode zugewandte Seitenfläche der Anode ist als Blende B_2 ein kleiner Nickeltrichter eingesetzt, dessen Spitze mit der 1 mm weiten Oeffnung der dritten Blende B_3 zugekehrt ist, die sich in 19 cm Entfernung am anderen Ende des Anodenrohrs befindet und aus einem in massives Messing gebohrten 3 mm langen und 0,5 mm weiten Kanal von gleichfalls kreisförmigem Querschnitt besteht. Die Trichterform der zweiten Blende läßt infolge des günstigen Kraftlinienbildes, was zwischen ihr, dem Wehneltzylinder und der Kathode zustandekommt, erwarten, daß eine größere Anzahl Elektronen durch sie hindurchgelangt, als es bei einer gewöhnlichen Lochblende der Fall wäre. Der große Abstand zwischen B_2 und B_3 bezweckte ebenso wie die kanalförmige Gestaltung der dritten Blende ein möglichst parallel verlaufendes Kathodenstrahlbündel. Mit Hilfe des zwischen den Blenden B_2 und B_3 befindlichen krückenartig geformten Halters H konnte das Anodenrohr um Bruchteile von Millimetern gehoben und gesenkt oder seitlich verschoben werden. Der Halter war verschraubbar auf einen Chromnickeleisenstab aufgesetzt, der in einem Glasfuß eingeschmolzen war und mitsamt diesem durch einen kleinen Fettschliff gedreht werden konnte.

Der Zylinder Z von 4 cm Höhe und 3 cm innerem Durchmesser diente zum Auffangen der vom Reflektor R ausgesandten Elektronenstrahlung. Der Reflektor selbst bestand aus einem 0,16 mm starken Deckgläschen von 15·15 mm^2 Oberfläche, dessen eine Seite durch Vakuumsublimation mit einem Zinnspiegel versehen war. Das Glasplättchen wurde mittels der am Reflektorhalter angebrachten kleinen Schrauben mit der verzinnten Rückseite an eine Zwischenlage von Stanniol angepreßt und dadurch mit dem Reflektorhalter gut leitend verbunden. Dieser wurde ebenfalls mit Hilfe eines kleinen Fettschliffs gedreht, in den wiederum Chromnickeleisenstab eingeschmolzen war, an dessen oberen Enden zwei Zapfen in entsprechende Schlitze eines Messingstabes eingriffen, mit dem der Reflektorhalter fest verschraubt war. Der Reflektor wurde so befestigt, daß seine Oberfläche möglichst in einer Ebene mit der Drehachse lag. Die senkrechte Welle besorgte gleichzeitig die elektrische Ableitung und war vom Zylinder Z durch den starken Quarzring Q isoliert. Die Weiterleitung der Reflektorströme geschah durch einen Kupferdraht, der zu einer Durchschmelzung führte. Aehnlich war die Ableitung vom Anodenrohr beschaffen.

In der Mitte des drehbaren Messingstabes war in einer ausgefeilten Vertiefung ein kleiner Spiegel angebracht. In gleicher Höhe befand sich außerhalb des Beobachtungsrohres ein hochkant gestelltes, kreisrund gebogenes Metallband von 72 cm Umfang, das eine bis auf einen halben Grad genau ablesbare Winkelskala trug. Im Nullpunkt dieses Teilkreises war ein vertikaler Spalt vorhanden, durch den das mittels eines zweiten Spaltes ausgeblendete und mit Hilfe einer Bikonvexlinse parallel gemachte Licht einer kleinen Glühlampe fiel. Vom Spiegel an der Messingwelle reflektiert, gab der Lichtzeiger am Teilkreis den doppelten Winkel an, um den der Reflektor gedreht wurde. Der Einfallswinkel der Kathodenstrahlen ließ sich also auf 15 Minuten genau ermitteln.

Kathode und Wehneltzylinder, sowie die Anode konnten durch den gleichen Fettschliff am Entladungsrohr in die Apparatur eingeführt oder daraus entfernt werden. Am selben Ende des Anodenrohrs befand sich eine Kühlvorrichtung, um eine schädliche Erwärmung des Schliffes durch die nahe Glühkathode zu verhindern. Das Einsetzen des Auffangzylinders Z nebst Reflektorhalter und Drehvorrichtung geschah durch den am unteren Ende des Beobachtungsrohrs angesetzten großen Fettschliff.

Die Verwendung von mehreren Fettschliffen in dieser Hochvakuumapparatur erscheint unbedenklich dank der Tatsache, daß die Verfasser früherer Arbeiten über den gleichen Gegenstand beim Ersetzen der Fettdichtungen durch solche von Siegellack oder selbst unter Vermeidung jedes Schliffs zur Erreichung höherer Luftleere keine verbesserten oder veränderten Meßergebnisse erzielen konnten (11,14,15). Unter Benutzung eines hochwertigen Hahnfettes wurde mit einer zweistufigen Quecksilberdiffusionspumpe und einer Wasserstrahlpumpe, die das Vorvakuum herstellte, gutes "Klebevakuum" erhalten, und zwar etwa 18 Minuten nach Inbetriebsetzung der Anlage. Ein Mac-Leod-Manometer zeigte den Druck bis auf 10^{-5} mm Hg genau an. Das Vakuum betrug während der Messung $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-5}$ mm Hg. Eine mit flüssiger Luft gekühlte Ausfriertasche hielt Quecksilber- und Wasserdämpfe von der Apparatur fern. Da die eigentliche Apparatur ein kleines Volumen und damit einen geringen Vakuumraum besaß, war an das obere Ende des vertikalen Rohrs ein Glasballon von 3 l Inhalt angeblasen, um etwaigen Gasausbrüchen zu begegnen und die aus der Kathode freiwerdenden Gase fürs erste durch dieses Reserve-Vakuum aufsaugen zu lassen.

Der elektrische Teil dieser Versuchsanordnung ist als Schaltskizze in den Abbildungen 2 und 2a wiedergegeben. Den Heizstrom für die Kathode K lieferte eine 6-zellige Akkumulatorenbatterie Hb von 4 V Spannung. Zwei Schiebewiderstände W_2 und W_3 dienten im Heizkreis zur Grob- und Feinregulierung, ein Mavometer A mit Nebenschlußwiderstand zur Messung der Stromstärke. Die negative Hochspannung für die Kathode wurde einer Transformatoranlage entnommen. 50-periodiger Wechselstrom von 220 V wurde von einem Transformator von 1,8 kVA Leistung bei mittlerer Unterteilung der Sekundärwicklung in Wechselstrom von 3000 V Effektivspannung umgeformt. Mittels zweier in Vollwellen- (Doppel-Halbwellen-) Schaltung angeordneter Glühkathoden-Ventilröhren wurde dieser Strom gleichgerichtet. Der resultierende Gleichstrom von ungefähr 4200 V wurde über eine eingliedrige Drosselkette, deren Kondensatoren eine Kapazität von je 5 MF besaßen, dem regulierbaren Flüssigkeitswiderstand W_1 zugeführt, dessen Elektrolyt aus einer Lösung von Kadmiumjodid in iso-Amylalkohol bestand. Je nach dem Verdünnungsgrad dieser Lösung standen Widerstände von 0,1 MΩ bis zu solchen beliebiger Größe zur Verfügung. Ein Gesamtwiderstand von anfänglich 1,8 MΩ, später von etwa 10 MΩ war geeignet, um die für die Emission nötigen Ströme und Spannungen abgreifen

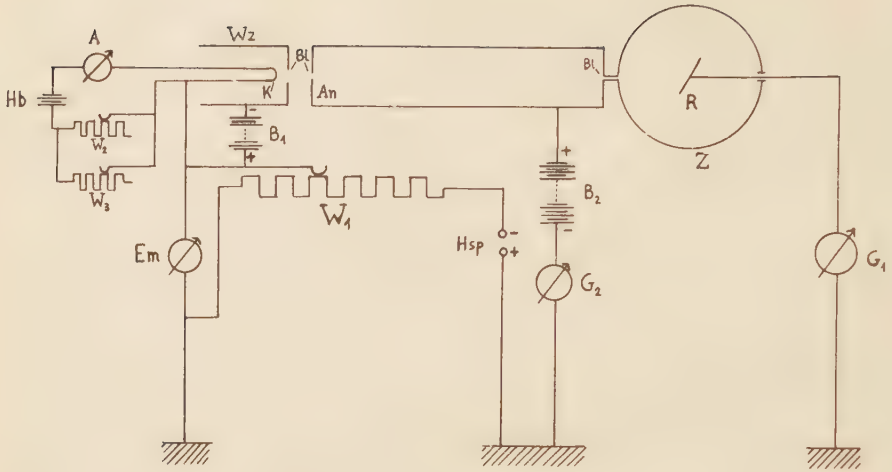


Abb. 2

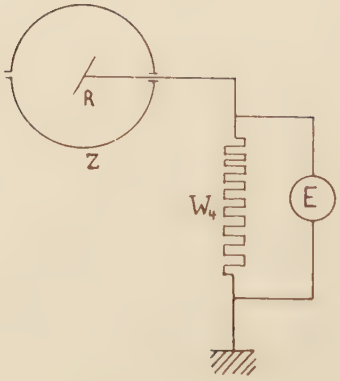


Abb. 2a

zu können. Das Hochspannungspotential der Kathode wurde mit dem Braunschen Elektrometer Em (Meßbereich: 200 - 3500 V), während einiger Versuche, bei denen höhere Spannungen angewendet wurden, mit einem elektrostatischen Voltmeter von Hartmann & Braun, einem nach dem Prinzip der elektrostatischen Anziehung geladener Platten gebautes Zeigerinstrument (Meßbereich: 3000 - 7000 V), gemessen.

An den Wehneltzylinder Wz wurde mittels der Trockenbatterie B_1 ein, gegen die Kathode gemessen, negatives Potential von wechselnder Höhe gelegt. Die Konzentrationswirkung dieses Zylinders hängt außer von seiner geometrischen Ausrichtung aufs empfindlichste von der Wahl der an ihn gelegten Spannung ab. Dies soll die folgende Tabelle 1 verdeutlichen, die gut vergleichbare Potentialwerte des Wehneltzylinders für Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit enthält. Sämtliche Angaben in dieser Tabelle entstammen Messungen an ein und derselben unverändert gebliebenen Elektrodenanordnung. Geringfügige Verschiebungen des Zylinders verursachten nämlich eine erhebliche Veränderung des Kraftlinienbildes zwischen den Elektroden, die sich alsbald dadurch bemerkbar machte, daß keine oder nur äußerst wenig Kathodenstrahlung durch die Blenden auf den Reflektor gelangte. Ist dennoch eine derartige Aenderung erfolgt, so muß die Spannung am Wehneltzylinder neu ermittelt werden und ist von der ursprünglichen meist sehr verschieden. Diese neuen Potentialwerte, die sich daraus für die einzelnen Elektronengeschwindigkeiten ergeben, sind demnach nicht mit den vorher gültigen vergleichbar. Die günstigste Spannung am Konzentrationszylinder wurde vor Beginn jeder Versuchsreihe nach dem Grundsatz erprobt, maximale Primärstromstärke bei möglichst geringer Emissions- und Heizstromstärke zu erzielen; es wurde also die bestmögliche "Ausrichtung" des Kathodenstrahlbündels durch das Blendensystem festgestellt und verwertet. - In der ersten Spalte der Tabelle 1 sind die Beschleunigungsspannungen der Kathodenstrahlen, in der zweiten die zugehörigen Potentiale am Wehneltzylinder enthalten. In der dritten Kolonne ist der Kathodenheizstrom, in der vierten die Emissionsstromstärke und in der fünften der gemessene Anteil der Sekundärstrahlstromstärke bei senkrechtem Einfall der Primärstrahlung aufgetragen. Die in den beiden ersten Spalten dieser Uebersicht mitgeteilten Werte in einem Kurvenbild, etwa als Funktion $U_Z = f(U_A)$

darzustellen, wäre nicht angängig, da die Emission bei den meisten Messungen verschieden groß war. Trotzdem ist deutlich erkennbar, daß die Höhe des am elektrostatischen Zylinder erforderlichen Potentials mit der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen wächst.

Tabelle 1.

I U_A	II U_z	III I_H	IV I_A	V I_s
660 V	12,5 V	2,68 A	$4{,}23 \cdot 10^{-6}$ A	$1{,}31 \cdot 10^{-9}$ A
860	19	2,67	3,62	1,32
960	22	-	3,08	3,82
960	25	2,69	2,42	3,56
1060	27	2,70	3,08	2,75
1060	29	2,70	1,81	3,25
1160	29,5	2,71	2,31	4,74
1160	32	2,70	1,81	6,15
1260	35	2,65	1,81	6,55
1360	39	2,64	1,21	5,24
1460	42	2,63	1,21	4,90
1660	45,5	2,60	1,15	2,88
1660	45,5	2,43	1,21	3,41
1860	51,5	2,47	1,21	2,24
2060	51,5	2,61	3,85	2,14
2460	69	2,57	1,54	1,05
2560	68,5	2,62	3,85	2,78
2860	87	2,60	1,15	2,02
3260	94	2,58	1,15	1,31
3660	102	2,68	1,81	2,88
3960	109	2,70	2,42	2,93
4260	120	2,65	2,42	3,20

Um die primären Kathodenstrahlen in noch höherem Maße zu konzentrieren, wurde bei Vorversuchen gelegentlich eine eisengekapselte kurze Magnetspule, - wie sie hauptsächlich bei Arbeiten mit dem Elektronenmikroskop Verwendung findet, - benutzt. Hierzu wurde die Spule, die einen inneren Durchmesser von 6 cm besaß, über das Entladungsrohr geschoben und in etwa 2 cm Abstand von Blende B_2 und ungefähr 17 cm von Blende B_3 entfernt zwischen diesen beiden Diaphragmen angeordnet. Zur Einstellung der Brennweite dieser magnetischen Linse konnte die Weite eines ringförmigen

Spaltes, aus dem die magnetischen Kraftlinien traten, durch Verschraubung einer zur Abschirmung dienenden Seitenwand der Spulenkapsel verändert werden; die benutzte Spaltweite betrug 1 cm. Durch diese Anordnung wurde eine Vergrößerung der Galvanometerausschläge bis auf das 50-fache erreicht. Jedoch konnten keine verzerrungsfreien Kurven der Sekundäremission erzielt werden, was mit großer Wahrscheinlichkeit auf die erhebliche Erwärmung des Reflektors durch die nunmehr ziemlich starke Primärstrahlung zurückgeführt werden darf. Außerdem haben geringe Schwankungen der Feldstromstärke der magnetischen Linse Veränderungen der Richtung und Konzentration der Kathodenstrahlen zur Folge, die sich natürlich gleichfalls bei der Rückstrahlung geltend machen. Da eine Abänderung der Apparatur zugunsten elektronenoptischer Gesichtspunkte, wie sie zur Beseitigung der zweiten Fehlerquelle notwendig gewesen wäre, mit Rücksicht auf die übrigen experimentellen Erfordernisse nicht ratsam schien, wurde auf die magnetische Spule als Konzentrierungsmittel verzichtet.

Die Anode An und der Zylinder Z erhielten durch eine Trokkenbatterie B_2, deren negativer Pol geerdet war, ein positives Potential von 60 V, um Raumladungen, die sich um den Reflektor herum bilden und die Sekundärstrahlung behindern könnten, mit Sicherheit zu beseitigen. Schon 1912 hatte Moseley derartige Störungen beim Arbeiten mit Metallreflektoren bemerkt (17). Daß zu ihrer Vermeidung eine Gegenspannung von 60 V ausreichend ist, zeigen frühere Messungen (7,8,10,11). Die Emission wurde mit dem in der Anodenableitung befindlichen Strommesser G_2 bestimmt. Als solcher fand anfangs ein Mavometer (Empfindlichkeit: 0,04 mA auf den Skalenteil) Verwendung, wurde jedoch, nachdem der thorierte Wolframdraht der Kathode durch den schwächer emittierenden reinen Wolframfaden ersetzt worden war, nacheinander mit zwei Türmchengalvanometern, die 0,6 und 0,38 Mikroampère durch einen Skalenteil Ausschlag anzeigten, vertauscht. Der Reflektor R war über das Instrument G_1, das zur indirekten Bestimmung der Sekundäremission diente, zur Erde abgeleitet. Gemessen wurde der Strom, der von der Erde zum Reflektor fließt. Denn da bei Isolatoren normaler Temperatur, - d.h. wenigstens unterhalb 80° C, - die Sekundärstrahlung stets mehr Elektronen enthält als mit den primären Kathodenstrahlen auf den Reflektor auftreffen, so werden die aus seinen Atomen ausgelösten elektrischen Quanten durch Zustrom

---

(17) H.G.J.Moseley, Proc.Roy.Soc.A87 (1912),230.

von Seiten der Erdung ergänzt. Erhitzt sich der Isolator stark, so wird er allmählich leitend und zeigt, wie schon oben erwähnt, metallischen Charakter. Dann verschwindet die für Isolatoren typische Anomalie des Sekundärstroms, der nunmehr schwächer wird, bis Gleichgewicht zwischen Primär- und Sekundärstrahlung besteht, und kein Strom mehr durch das Galvanometer fließt. Schließlich wechselt der Strom, der das Instrument durchfloß, den Richtungssinn: Die überzähligen Primärelektronen werden zur Erde abgeleitet. - Anfänglich wurde zu diesen Messungen ein Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske benutzt, das 10000Ω inneren Widerstand und bei 6 m Skalenabstand eine Empfindlichkeit von $1{,}37 \cdot 10^{-10}$A auf 1 mm Ausschlag besaß. Die Ablesung der Ausschläge geschah mit dem Fernrohr. Da dies Galvanometer jedoch eine zu große Schwingungsdauer hatte, was die aus zahlreichen Einzelbeobachtungen bestehenden Messungen unnötig verzögerte, und da eine Erhöhung der Dämpfung des Instruments auf Kosten seiner Empfindlichkeit nicht erfolgen durfte, wurde es durch ein Spiegelgalvanometer von Hartmann & Braun ersetzt. Dieses Instrument, ebenfalls von 10000Ω innerem Widerstand, besaß eine ausgezeichnete Dämpfung, zumal, wenn seine Klemmen noch über einen Widerstand von 100000Ω kurzgeschlossen wurden; es hatte dann noch die hohe Empfindlichkeit von $2{,}62 \cdot 10^{-11}$A auf einen Teilstrich der 2 m entfernten Skala. Sämtliche im folgenden mitgeteilten Versuchsergebnisse sind, - soweit diese überhaupt unter Benutzung eines Spiegelgalvanometers erhalten wurden, - mit jenem zweiten Instrument von höherer Empfindlichkeit und Dämpfung erzielt worden.

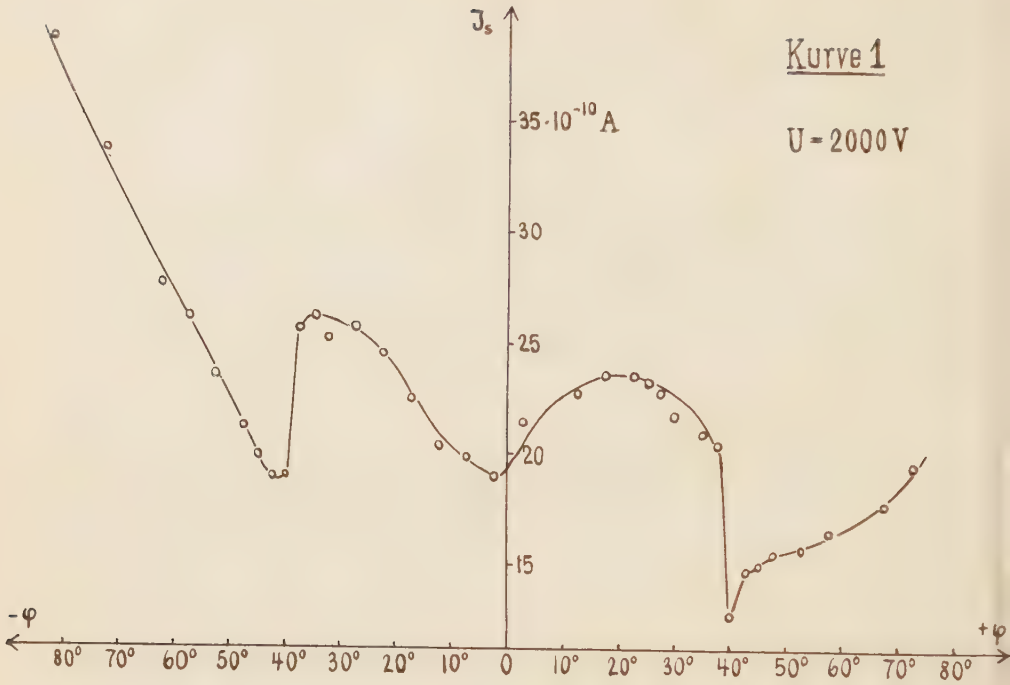
Schaltskizze 2a gibt die Ableitung des Reflektors zur Erde wieder, wenn an die Stelle des Galvanometers ein Elektrometer trat. W_4 war ein konstanter Flüssigkeitswiderstand von $2{,}95 \cdot 10^9\Omega$, der aus einem mit einer Lösung von CdJ_2 in iso-Amylalkohol gefüllten U-Rohr bestand, das in Paraffin gebettet und von einer geerdeten Messingkapsel allseitig umschlossen war. Die beiden durch die Kapsel geführten Zuleitungen waren durch Bernstein isoliert. Die Potentialdifferenz an den Enden dieses Hochohmwiderstandes wurde mit einem Einfaden-Elektrometer mit Hilfspotential an den Schneiden gemessen. Die Spannungsempfindlichkeit dieses Instruments betrug bei einem Ausschlag über die halbe Skala 0,0494 V auf den Teilstrich. Das entspricht nach dem Ohmschen Gesetz einer Stromempfindlichkeit von $1{,}67 \cdot 10^{-11}$A für einen Skalenteil. Das Elektrometer selbst, sowie sämtliche mit ihm zusammen-

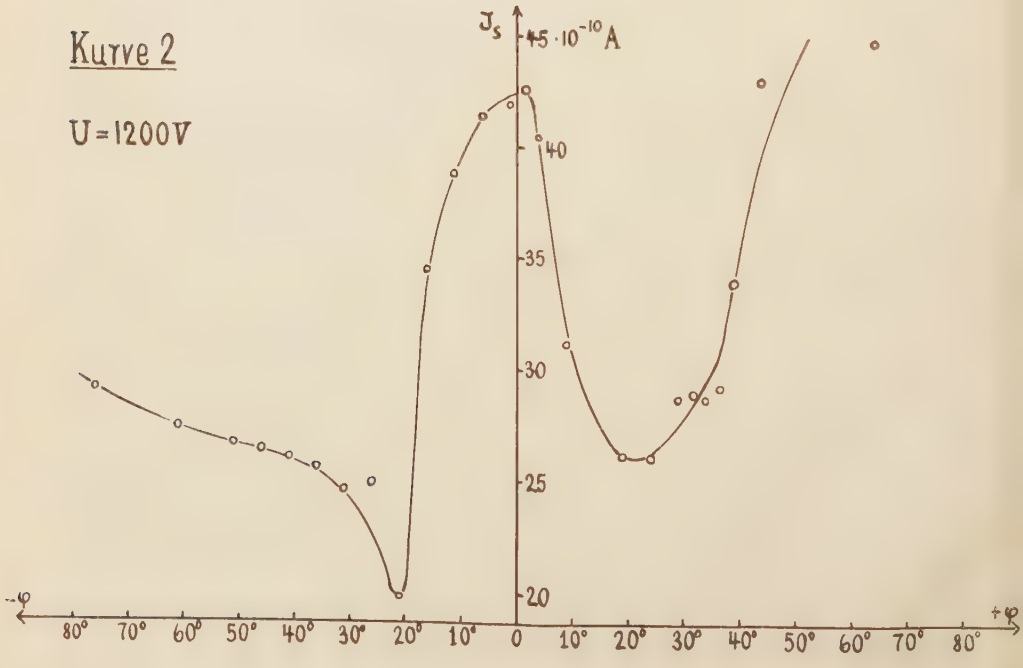
hängenden Teile und Zuleitungen wurden nacheinander sorgfältig elektrostatisch abgeschirmt, und damit alle Störungen, die sich zu Anfang, namentlich durch das Wechselfeld der Transformatoranlage, bemerkbar machten, systematisch beseitigt.

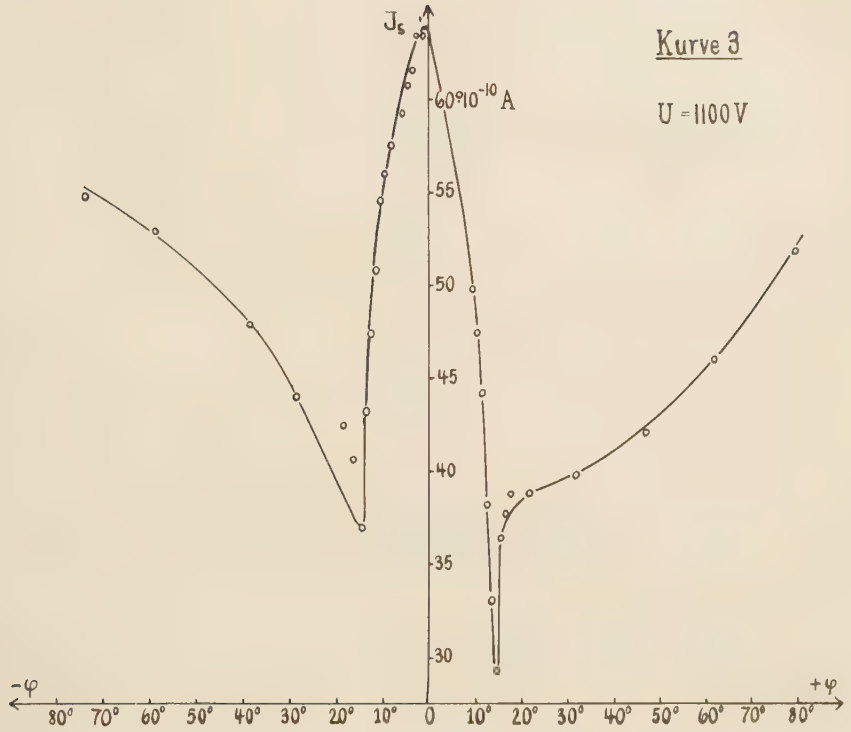
Versuchsergebnisse.

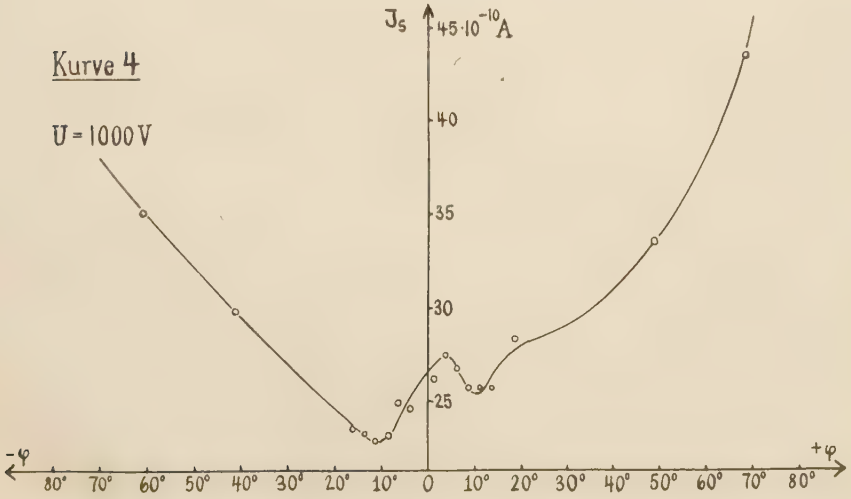
Mit der oben beschriebenen Versuchsanordnung konnten mit einem erhöhten Maße von Genauigkeit als bisher Messungen der Winkelabhängigkeit der von Prof. Wehnelt entdeckten, für Isolatoren kennzeichnenden Eigenschaft ihrer sekundären Kathodenstrahlung vorgenommen werden. Die Ergebnisse eines Teils dieser Untersuchungen sind in den beigefügten Kurven 1-14 wiedergegeben.

Es wurde durch die ausgeführten Messungen von neuem auf das beste bestätigt, daß der Abfallwinkel des Sekundärelektronenstroms mit wachsender Primärstrahlgeschwindigkeit größere Werte annimmt. Nachdem eine Anzahl Versuche an solchen Sekundärstrahlen angestellt worden war, die ihre Entstehung primärer Kathodenstrahlung von 1500 V bis 2800 V Beschleunigungsspannung verdankten, wurden Messungen an Sekundärelektronen vorgenommen, die von Primärstrahlen größerer Schnelligkeit als 2800 V und geringerer als 1500 V erregt wurden. War man doch auf Grund der bisher bekannten Beobachtungen an Sekundärstrahlung von Isolatoren der Ansicht, daß die Anomalie dieser Strahlung sich auf solche beschränke, die von Primärstrahlen des Geschwindigkeitsbereichs zwischen 1300 V und 3000 V erzeugt werde; selbst 1500 V wurde gelegentlich als untere Grenze dieses Spannungsintervalls angenommen (15). Die Versuche mit Kathodenstrahlen von 3200, 3600, 3900 und 4200 V zeigten, daß der beobachtete Effekt nicht nur bei Geschwindigkeiten oberhalb 3000 V vorhanden ist, sondern in diesem Gebiet sogar besonders deutlich in Erscheinung tritt. Die Messungen unterhalb 1500 V gestalteten sich schwieriger, da der untersuchte Schwund der Stromstärke bei Sekundärstrahlung, die langsameren Primärelektronen entstammt, mit sinkender Beschleunigungsspannung immer weniger ausgeprägt auftritt, was sich in den Kurven durch zunehmende Verflachung der charakteristischen Minima ausdrückt. Immerhin konnte die anomale Verminderung des Sekundärstroms beim kritischen Winkel bis zu 1000 V Primärgeschwindigkeit herunter deutlich nachgewiesen werden; auch bei 900 V war sie noch erkennbar. Später wurden die Versuche unterhalb 1500 V mit dem Einfaden-Elektrometer wiederholt, um die mit dem Spiegelgalvano-


Kurve 1
U = 2000 V
J_s
$35 \cdot 10^{-10}$ A
30
25
20
15
$-\varphi$
$+\varphi$
80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80°

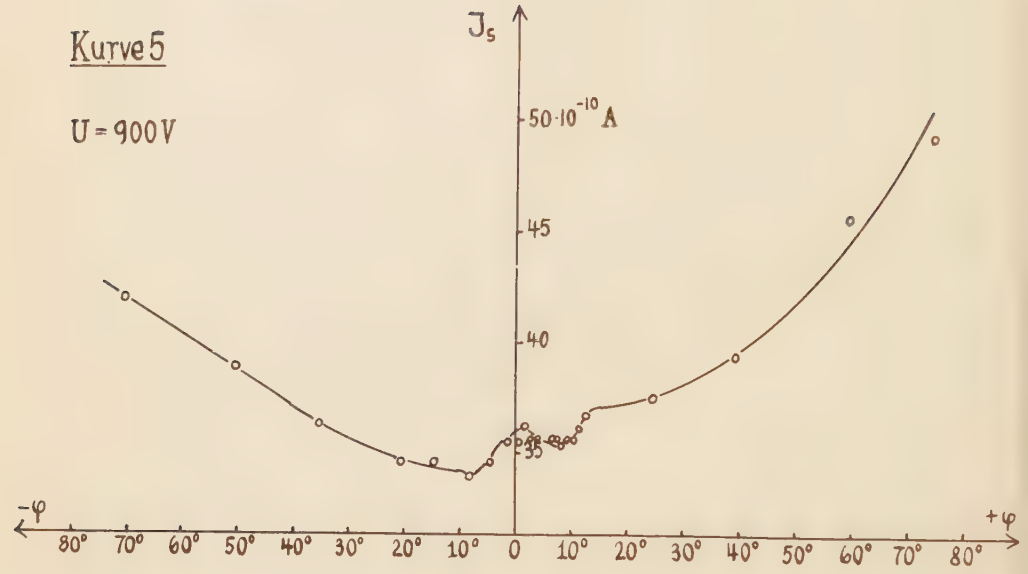

Kurve 2
U = 1200 V
J_s
$45 \cdot 10^{-10}$ A
40
35
30
25
20
$-\varphi$
$+\varphi$
80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80°


Kurve 3
U = 1100 V
J_s
$60 \cdot 10^{-10}$ A
55
50
45
40
35
30
$-\varphi$
$+\varphi$
80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80°


Kurve 4
U = 1000 V
J_s
$45 \cdot 10^{-10}$ A
40
35
30
25
$-\varphi$
$+\varphi$
80° 70° 60° 50° 40° 30° 20° 10° 0 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80°

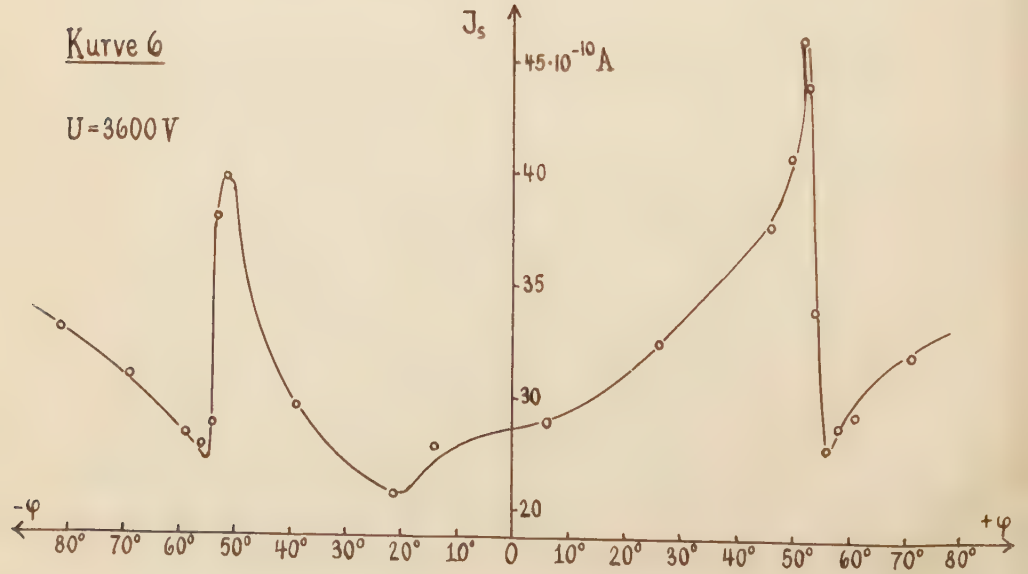
Kurve 5

U = 900 V



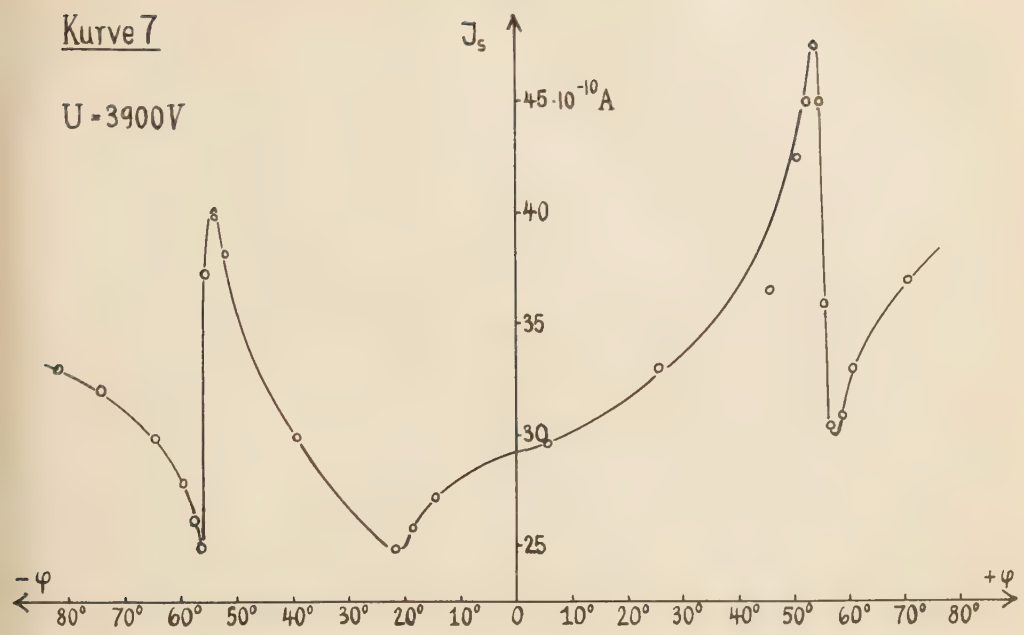
Kurve 6

U = 3600 V



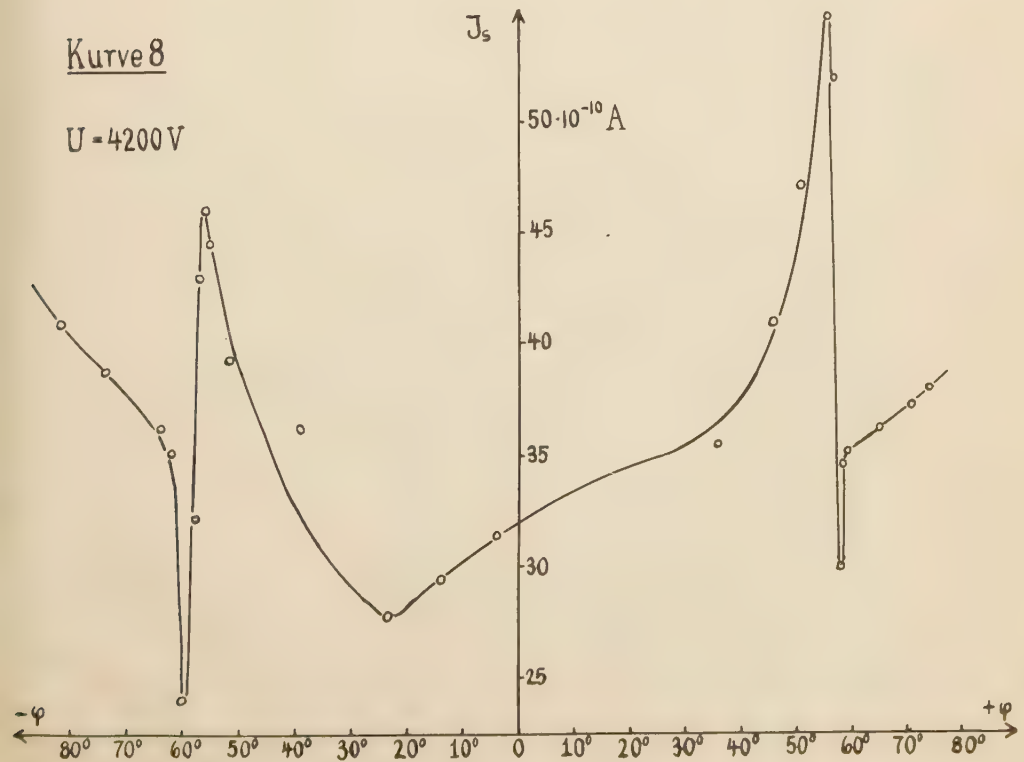
Kurve 7

U = 3900 V



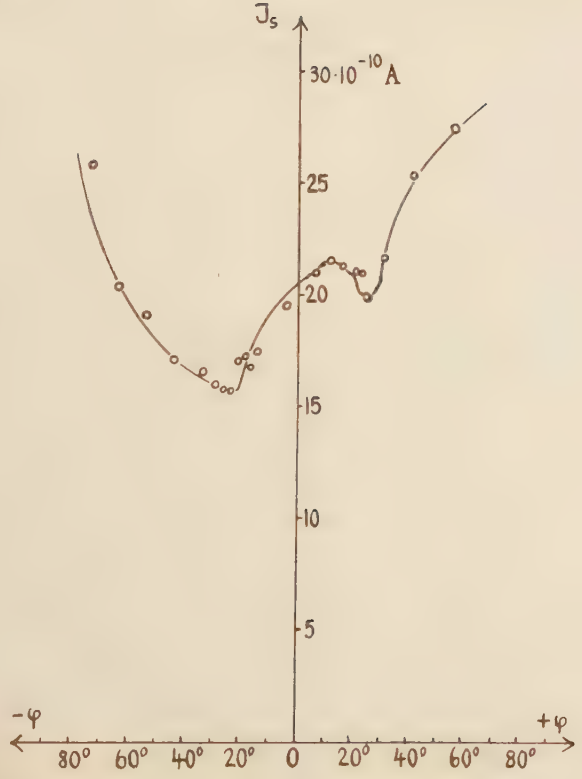
Kurve 8

U = 4200 V



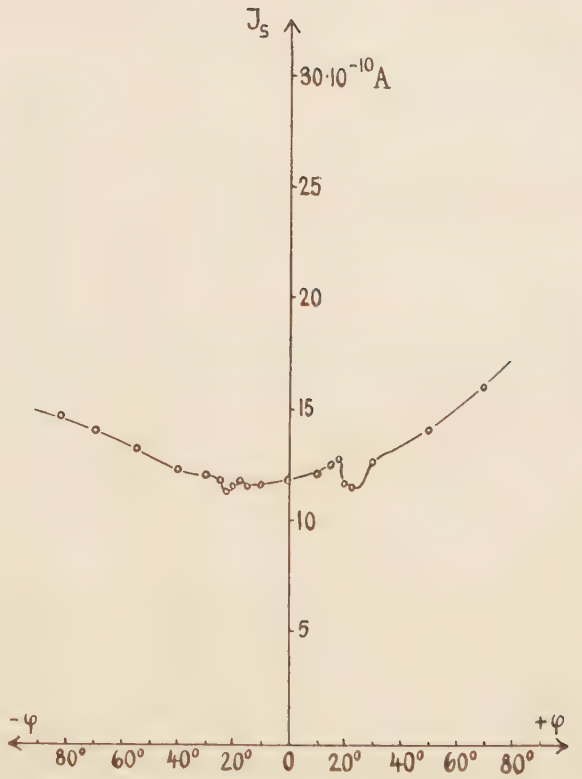
Kurve 9

U = 1300 V

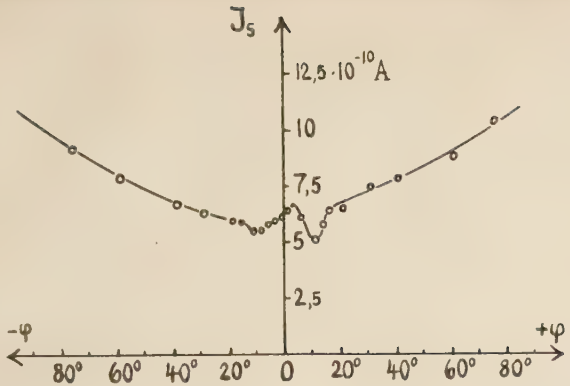


Kurve 10

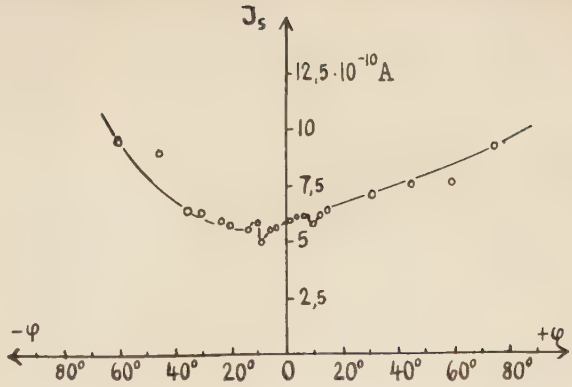
U = 1200 V



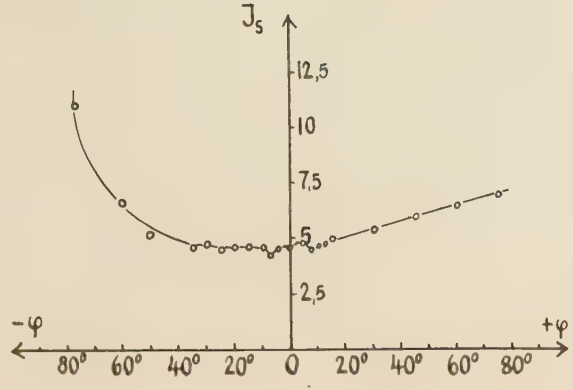
Kurve 11 U = 1000 V



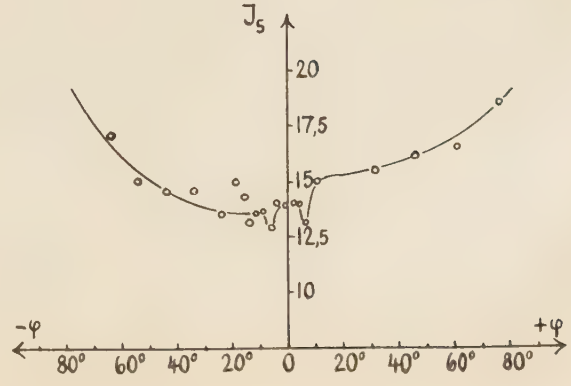
Kurve 12 U = 900 V



Kurve 13 U = 800 V



Kurve 14 U = 700 V



meter erzielten Meßergebnisse sicherzustellen. Dies gelang ebenso wie die weitere Feststellung des Effekts bei 700 und 800 V Primärgeschwindigkeit. Allerdings kommt den unterhalb 1000 V bestimmten Werten des kritischen Winkels nicht der gleiche Grad an Genauigkeit zu wie den bei höheren Spannungen erhaltenen Resultaten, da, wie aus den Kurvenbildern ohne weiteres zu ersehen, die untersuchte Erscheinung zwar noch qualitativ feststellbar ist, aber eine sichere zahlenmäßige Auswertung der Ergebnisse nicht mehr zuläßt. Jedenfalls darf man auf Grund der mitgeteilten Meßergebnisse mit Bestimmtheit behaupten, daß die Erscheinung des charakteristischen Schwund-Effekts der Sekundäremission von Isolatoren keineswegs auf einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich der sie erzeugenden primären Kathodenstrahlung begrenzt ist.

Zur Theorie der untersuchten Erscheinung.

Wenn in den bisherigen Ausführungen von "Sekundärstrahlung" die Rede war, so wurde darunter die Gesamtheit aller Elektronen verstanden, die als Folge des Aufpralls oder der Annäherung der primären Kathodenstrahlen die Oberfläche des Reflektors oder deren nächste Nähe verließen, um den Zylinder Z zu erreichen und zur Erde abgeleitet zu werden. Eine Unterscheidung der "sekundären" Elektronen hinsichtlich ihrer Herkunft erfolgte also nicht; doch ist eine solche für die folgenden Betrachtungen notwendig. Zu diesem Zweck empfiehlt sich ein Zurückgreifen auf ältere Arbeiten, die über sekundäre Kathodenstrahlung berichten

Bereits die seit Jahrzehnten angestellten zahlreichen Versuche über die Reflexion von Kathodenstrahlen an Metallen ließen die Frage nach der Natur der dabei entstehenden "reflektierten" oder "sekundären" Elektronenstrahlung lebendig werden. Daß es sich hier um Elektronen handelte, wurde bald erkannt, aber deren Herkunft blieb umstritten. Die Feststellung, daß bei Anodenspannungen von einigen hundert oder tausend Volt diese Strahlung größtenteils aus Elektronen wesentlich geringerer Geschwindigkeiten bestand, führte ziemlich allgemein zu der Ansicht, daß sie überwiegend aus sekundären, d.h. aus der Substanz des Reflektors ausgelösten Elektronen bestünde, während "rückkehrende Elektronen", wie sie Lenard nennt, nur in verschwindendem Maße an ihr beteiligt seien (4,16,18,19,20,21). Auch die von nichtmetalli-

---

(18) P.Lenard, Ann.d.Phys.12(1903),474.
(19) " " , Ann.d.Phys.15(1904),485.

schen festen Stoffen emittierte Strahlung ist in der Hauptsache von geringer Geschwindigkeit (12-15). - Lenard bezeichnet die Summe aller Elektronen, die den Reflektor oder seine Oberflächenumgebung verlassen, als "austretende Elektronen" und unterscheidet bei diesen zwischen "Sekundärelektronen", die aus angeregten Atomen stammen, und "rückkehrenden Elektronen". Die letztgenannte Art besteht - nach der bei Lenard und A.Becker üblichen Bezeichnungsweise (1,20,22,23) - aus Primärelektronen, die entweder als schnelle "(echt) reflektierte Elektronen" durch das Zusammentreffen mit einem einzigen Atom aus ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt wurden oder als "rückdiffundierte Elektronen" "das Resultat wachsender Ablenkungen beim aufeinanderfolgenden Durchdringen vieler Atome" sind. Diese Einteilung wurde auf Grund von Versuchen an Metalloberflächen und an Gasen vorgenommen.

Für nichtleitende feste Stoffe wäre zur Gruppe der rückkehrenden Elektronen noch eine neue Art hinzuzufügen, nämlich die Menge derjenigen Elektronen, die von dem Potential, das die primären Kathodenstrahlen im Isolator erzeugen, bzw. dessen Oberflächenwirkung zufolge "echt" reflektiert werden, ohne in das Innere des Reflektors oder auch nur eines seiner Atome einzudringen. Hiernach ist ohne weiteres einzusehen, daß bei Isolatoren die Anzahl der wirklich reflektierten Elektronen größer sein muß als bei Metallen, deren Leitfähigkeit die Ausbildung eines beträchtlichen Potentials und damit eines stark wirksamen elektrostatischen Feldes an der Oberfläche verhindert. Dieser Auffassung scheinen zwar die oben erwähnten Geschwindigkeitsmessungen, die an austretenden Elektronen von Isolatoren unternommen wurden, entgegen zu stehen, doch beruht die dort wie andernorts zum Ausdruck gebrachte Annahme, daß kein oder nur ein äußerst geringer Anteil von reflektierter Primärstrahlung vorhanden sei, lediglich auf der - meist stillschweigend gemachten - Voraussetzung, daß Elektronen nach erfolgter Reflexion fast die gleiche Geschwindigkeit haben müßten wie vordem. Noch nie scheint genauer die Frage untersucht worden zu sein, welche Verzögerungen Kathodenstrahlen nach ihrer Reflexion erfahren können, bevor sie auf den Auffänger oder etwa den Faradaykäfig, an dem man ihre Geschwindigkeit mißt, gelangen. Es scheinen mir wenigstens 3 Ursachen zu bestehen, die

---

(20) Aug.Becker, Ann.d.Phys.78(1925),228.
(21) H.E.Farnsworth, Phys.Rev.20(1922),358.
(22) Aug.Becker, Ann.d.Phys.17(1905),428.
(23) " " , Ann.d.Phys.58(1919),393.

zu einer derartigen Verzögerung reflektierter Kathodenstrahlen beitragen könnten. Zunächst soll eine kurze Berechnung zeigen, daß die Möglichkeit einer Beeinflussung reflektierter Elektronen durch einfallende primäre besteht.

In Abbildung 3 ist ein unter dem Winkelφ einfallendes Kathodenstrahlbündel vom Durchmesser d dargestellt, das an der Oberfläche des Reflektors zurückgeworfen wird. Die vereinfachte Annahme quasioptischer Reflexion des Elektrons darf hier gemacht werden, da die Entfernung der beiden Aeste der Parabelbahn, die das Elektron in Wirklichkeit unter dem Einfluß des Oberflächenpotentials beschreibt, klein gegen den Durchmesser des Strahlenbündels ist. Ein Elektron, das von der Oberfläche reflektiert wird, hat dabei je nach seiner Lage innerhalb des Strahlenbündels auf einer mehr oder weniger großen Strecke s die einfallende Kathodenstrahlung zu durchqueren. Die geometrische Betrachtung zeigt, daß diese Strecke s, je nach dem Ort auf der Strecke LN, von dem aus das reflektierte Elektron die Reflektoroberfläche verläßt, der Ungleichung folgt:

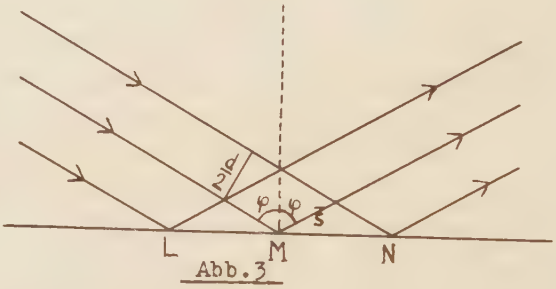


Abb.3

$$0 \leq s \leq \frac{d}{\sin(2\varphi)}.$$

Das Verhalten aller Elektronen im Strahlenbündel wird im Mittel am besten dargestellt durch das in der Mitte des Querschnitts im Punkt M befindliche Elektron. Der Weg innerhalb der Primärstrahlbahn, den dieses Elektron zu durchlaufen hat, ist offenbar

$$\bar{s} = \frac{d}{2 \cdot \sin(2\varphi)}$$

Für Einfallswinkel zwischen 15° und 75° nimmt diese Strecke $\bar{s}$ Werte zwischen d/2 und d an, wie das Einsetzen der Winkelgrößen zeigt. - Die Stromstärke der primären Kathodenstrahlung hatte im Durchschnitt ungefähr den Betrag $5 \cdot 10^{-9}$ A,wenn man auf Grund früherer Messungen von I.G.Barber (16) an Kupfer annimmt, daß bei den stärker sekundär emittierenden Isolatoren 50-100% mehr aus-

tretende als einfallende Kathodenstrahlung vorhanden ist. Barber hatte festgestellt, daß Kupfer bei größten Einfallswinkeln der Primärstrahlen nicht mehr als 150% derselben reemittiert. Da der gemessene Anteil des Sekundärstroms im Mittel etwa $3 \cdot 10^{-9}$ A ausmachte, und da dieser Anteil ja diejenige Elektronenmenge enthält, um welche die rückkehrende Strahlung reicher als die sie erzeugende primäre ist, so erscheint der Wert $5 \cdot 10^{-9}$ A für die Primärstromstärke angemessen.

Es werden also in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Kathodenstrahlbündels

$5 \cdot 10^{-9}$ Coulomb = $5 \cdot 10^{-9} \cdot 6{,}28 \cdot 10^{18}$ = $3{,}14 \cdot 10^{10}$ Elektronen

befördert. Zur Durchquerung des halben Durchmessers des Bündels d/2 = 0,025cm braucht das unter 45° reflektierte Elektron, - unter Voraussetzung völliger Störungsfreiheit, - bei einer Geschwindigkeit von $3 \cdot 10^{9}$ cm/sec, was einer Beschleunigungsspannung von 2575 V entspricht, $8{,}34 \cdot 10^{-12}$sec. Demnach fliegen während der Zeit, in der das reflektierte Elektron die Strecke $\bar{s}$ durcheilt,

$$3{,}14 \cdot 10^{10} \cdot 8{,}34 \cdot 10^{-12} = 0{,}262 \text{ Primärelektronen}$$

durch denjenigen Querschnitt, in dessen Ebene liegend wir uns die Austrittsbahn $\bar{s}$ denken. Das bedeutet, daß etwa jedes 4. reflektierte Elektron in die nähere Umgebung eines einfallenden Elektrons gerät und dort Ablenkung oder Bremsung erfahren kann.

Eine zweite Möglichkeit einer Verzögerung reflektierter Elektronen besteht im Vorhandensein der langsamen sekundären und rückdiffundierten Strahlung in dem Raum zwischen dem Reflektor und dem Auffänger. Die zurückgeworfenen primären Elektronen können, wenn sie mit der ihnen noch gebliebenen hohen Schnelligkeit die langsame sekundäre Strahlung durchqueren, durch Annäherung an deren Elektronen ebenfalls Ablenkungen und Geschwindigkeitsverluste erleiden.

Ferner kann eine aus dem Auffänger austretende Strahlung, die vom Reflektor kommende Elektronen dort auslösen, eine behindernde Wirkung auf die letzteren ausüben. Gerade bei der Gegenfeldmethode zur Bestimmung von Elektronengeschwindigkeiten wird ja eine Sekundäremission des verwendeten Auffängers durch dessen negatives Potential gegen die Umgebung äußerst begünstigt.

Wenn man - mangels genauerer, durch Versuche sichergestellter Kenntnis der Tatsachen - die soeben angeführten Gründe für eine Verzögerung reflektierter Elektronenstrahlen als hinreichende

Erklärung für das Vorhandensein einer reflektierten Kathodenstrahlung geringer Geschwindigkeit ansieht, so erhält der erste Teil einer, zuerst von O.Klemperer 1928 gegebenen Erklärung für den plötzlichen Schwund der Sekundärstrahlung von Isolatoren und die damit zusammenhängenden, experimentell aufgefundenen Gesetzmäßigkeiten ihre Bestätigung. Klemperer (24) erhielt unter Zugrundelegung seiner Anschauung dieser Vorgänge und der Ergebnisse der Wellenmechanik eine einfache Gleichung. Bald zeigte allerdings A.Joffé, daß das gleiche Resultat auch unter Benutzung der klassischen Elektrostatik zu erhalten sei (25). Daene und Schmerwitz, die zwar die Existenz reflektierter Primärelektronen bezweifelten, stellten eine Berechnung an, die zur selben Gleichung führte, wie sie die Vorgänger erhalten hatten.

Folgender physikalischer Inhalt ist allen diesen Auffassungen gemeinsam: Kathodenstrahlen, die auf einen Isolator auftreffen, bilden durch Ionisierung seiner Atome in diesem ein scharf begrenztes (26,27) Potential aus, sodaß von dem Reflektor eine elektrostatische Oberflächenwirkung ausgeht. Diese bewirkt, daß bei immer schräger werdendem Einfall von einem bestimmten Winkel an die Elektronen reflektiert werden und nicht mehr in das Innere des Isolators gelangen können, um dort Sekundärstrahlung auszulösen. Je schneller und somit energiereicher die Kathodenstrahlen sind, umso größer ist der Einfallswinkel, bei dem es dem Oberflächenpotential erst gelingt, sie vom Eindringen in die Masse des Reflektors zurückzuhalten. Der plötzliche Abfall in den Kurven, die man aus den Messungen der Sekundärstrahlung erhält, ist durch diese, beim kritischen Winkel einsetzende Reflexion der Kathodenstrahlen erklärt. Die oben erwähnten Berechnungen der Abhängigkeit des kritischen Abfallwinkels der Sekundärstrahlung von der Größe P des Oberflächenpotentials und der Beschleunigungsspannung U der Primärstrahlung führten zu folgendem Ausdruck:

$$\sin\varphi_m = \sqrt{\frac{U - P}{U}}.$$

Durch Umformung dieser Gleichung ergibt sich:

$$P = U \cdot \cos^2\varphi_m.$$

Da durch die Messungen die Größen U und φ_m bekannt sind, ergeben sich aus dieser Formel leicht die zugehörigen Potentialwerte des

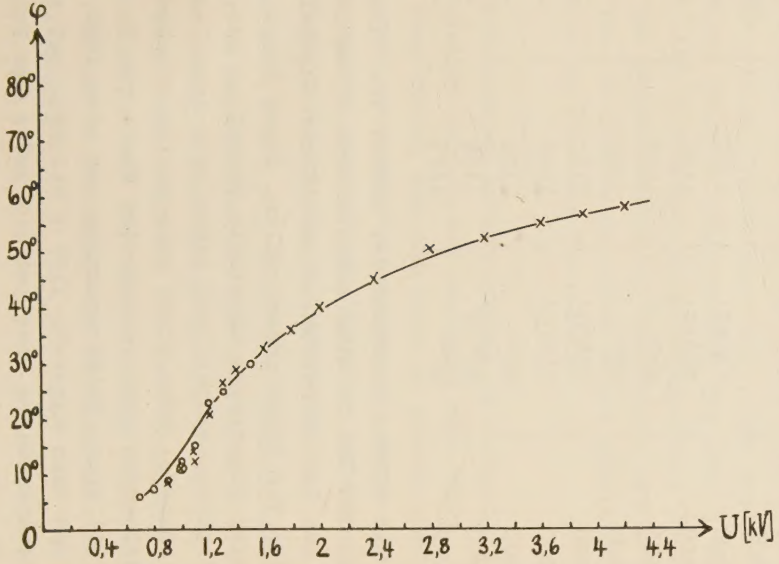
---

(24) O.Klemperer, Zs.f.Phys.47(1928),417.
(25) A.Joffé, Zs.f.Phys.48(1928),737.
(26) P.Selényi, Zs.f.Phys.47(1928),895.
(27) " " , Zs.f.techn.Phys.9(1928),451.

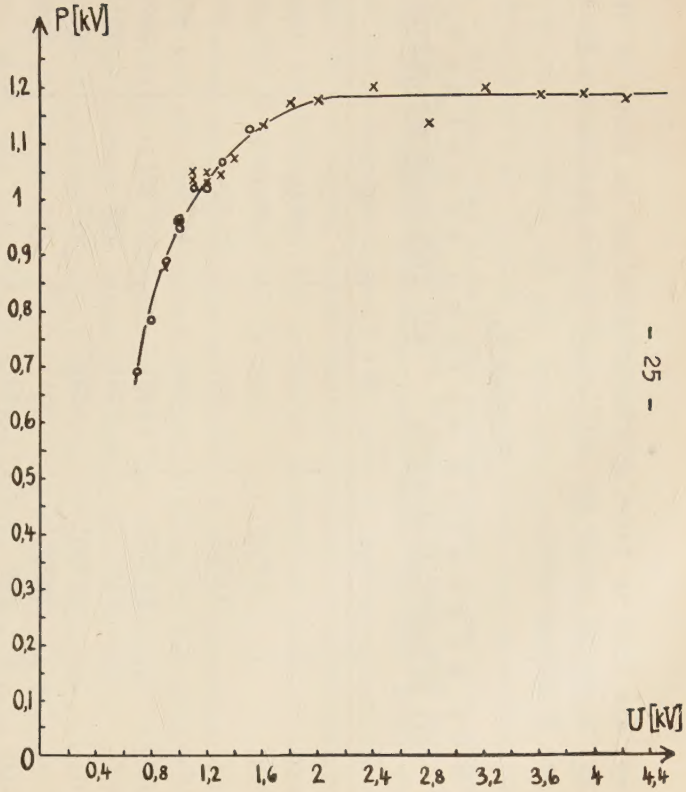
× Mit Spiegelgalvanometer gemessene Werte

○ " Fadenelektrometer " "

Kurve 15



Kurve 16



Glases; sie sind in Tabelle 2 mitgeteilt und in Kurve 16 dargestellt. Kurve 15 zeigt die Abhängigkeit des kritischen Winkels von der Primärspannung.

Tabelle 2.

Die Meßwerte wurden erhalten:

	Mit SPIEGELGALVANOMETER		Mit EINFADENELEKTROMETER	
U	φ_m	P	φ_m	P
700 V	-	-	6°15'	692 V
800	-	-	7°30'	786
900	8°30'	880 V	8°45'	879
1000	11°15'	962	11°15'	962
1000	11°	964	12°30'	953
1100	14°30'	1031	15°30'	1021
1200	21°	1046	23°	1017
1200	22°30'	1024	23°	1017
1300	26°30'	1041	25°	1068
1400	29°	1071	-	-
1500	-	-	30°	1125
1600	32°45'	1132	-	-
1800	36°15'	1171	-	-
2000	40°	1176	-	-
2400	45°	1200	-	-
2800	50°30'	1133	-	-
3200	52°15'	1199	-	-
3600	55°	1184	-	-
3900	56°30'	1188	-	-
4200	58°	1179	-	-

Die vordem herrschende, zuerst von Klemperer vertretene Ansicht, daß das in Glas ausgebildete Potential P einen konstanten Wert für Kathodenstrahlen sämtlicher Geschwindigkeiten $U \geq P$ habe, und daß für Elektronenstrahlen, deren Beschleunigungspotential geringer als dieses konstante Potential des Isolators ist, kein Oberflächenpotential und daher kein anomaler Sekundärstrahleffekt bestehe, kann nicht mehr gelten. Vielmehr zeigen die nach den Meßergebnissen berechneten Werte von P, daß dies Potential erst bei einer Primärspannung von etwa 1800 V annähernd konstant wird und dann ungefähr 1185 V beträgt; bei niedrigeren Beschleunigungsspannungen aber ist die Größe des Potentials beträchtlich geringer.

Zusammenfassung.

Es wurden Messungen der sekundären Kathodenstrahlung von Isolatoren vorgenommen und der charakteristische Winkel mit größerer Genauigkeit als bisher üblich bestimmt. Die Meßergebnisse zeigen, - entgegen den bisherigen Anschauungen - daß die winkelabhängige plötzliche Verminderung dieser Strahlung auch stattfindet, wenn die primären Kathodenstrahlen mehr als 3000 V und weniger als 1300 V Geschwindigkeit besitzen. - Der Schwundeffekt wird zwischen 700 und 4200 V Primärstrahlenspannung nachgewiesen. Mit steigender Schnelligkeit der primären Elektronen nimmt die Deutlichkeit der Erscheinung zu.

Es werden mehrere Gründe angeführt, die das Vorhandensein langsamer reflektierter Kathodenstrahlen jenseits des kritischen Winkels rechtfertigen. Hierdurch wird die von Klemperer stammende theoretische Deutung des anomalen Sekundärstrahl-Effekts unterstützt. Die Gleichung $\sin\varphi_m = \sqrt{\frac{U-P}{U}}$ bleibt nur bestehen, wenn P nicht mehr als Konstante, sondern als von U abhängige Variable angesehen wird. Die Berechnung des Potentials P des Glases unter Heranziehung der vorliegenden Meßergebnisse zeigt, daß dieses Potential höchstens von einer Primärstrahlspannung von 1800 V an mit einem Wert von etwa 1185 V konstant wird, keinesfalls aber, wie bisher angenommen, für Kathodenstrahlen beliebiger Geschwindigkeit eine Konstante ist. Elektronenstrahlen aller untersuchten Geschwindigkeiten erzeugen im Glas ein Potential.

Die Versuche zur vorliegenden Arbeit wurden im I.Physikalischen Institut der Universität Berlin auf Anregung von Herrn Prof.Dr. W e h n e l t ausgeführt, dem ich auch an dieser Stelle für den Hinweis auf den hier behandelten Gegenstand, sowie die meiner Arbeit entgegengebrachte gütige und fördernde Anteilnahme und Unterstützung meinen aufrichtigen Dank ausspreche.

Auch Herrn Prof.Dr. M. C z e r n y , der mir freundlicherweise eine Apparatur zur Vakuumsublimation zur Verfügung stellte, bin ich sehr verpflichtet, desgleichen Herrn Dr. J. K ö m m n i c k für Ratschläge. Schließlich möchte ich der "Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaften" für Ueberlassung von Instrumenten und der Firma Osram für Beschaffung von Kathodenmaterial meinen besten Dank aussprechen.

Lebenslauf.

Ich wurde am 7.Februar 1912 als Sohn des Kaufmanns Rudolf K a t z in Berlin geboren. Vom Frühjahr 1918 ab besuchte ich das Friedrichs-Realgymnasium zu Berlin. Dem naturwissenschaftlichen Unterricht an dieser Schule verdanke ich eine frühzeitige Neigung zur Physik und Chemie; praktische Uebungen in diesen Fächern gaben mir dort eine erste Anleitung zum naturwissenschaftlichen Arbeiten. Im Februar 1930 bestand ich am Friedrichs-Realgymnasium die Reifeprüfung und begann im Sommersemester des gleichen Jahres mein Studium der Physik, Chemie und Mathematik an der Berliner Friedrich-Wilhelms-Universität. Seit dem Sommerhalbjahr 1934 war ich bei Herrn Professor Dr. W e h n e l t im I.Physikalischen Institut der Universität Berlin an meiner Doktorarbeit tätig.

Herstellung: VDI-Verlag G.m.b.H., Berlin NW 7